

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»
Хіміко-технологічний факультет
Кафедра технології неорганічних речовин та загальної хімічної технології

ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ, ТЕХНОЛОГІЯ І
ОБЛАДНАННЯ АДСОРБЦІЙНИХ ПРОЦЕСІВ
Розділ 1 Промислові адсорбенти, їх властивості і застосування

Методичні вказівки до практичних занять
для студентів спеціальності 161 Хімічні технології та інженерія

Рекомендовано вченою радою ХТФ КПІ ім. Ігоря Сікорського

Київ
КПІ ім. Ігоря Сікорського
2017

Теоретичні основи, технологія і обладнання адсорбційних процесів: Розділ 1. Промислові адсорбенти, їх властивості і застосування: Методичні вказівки до практичних занять для студентів спеціальності 161 Хімічні технології та інженерія / Уклад.: І.М. Іваненко. – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2017. – 37 с.

*Гриф надано вченою радою
ХТФ КПІ ім. Ігоря Сікорського
(протокол №4 від 24.04.2017 р.)*

Електронне мережне навчальне видання

**ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ, ТЕХНОЛОГІЯ І
ОБЛАДНАННЯ АДСОРБЦІЙНИХ ПРОЦЕСІВ**
Розділ 1 Промислові адсорбенти, їх властивості і застосування

Методичні вказівки до практичних занять
для студентів спеціальності 161 Хімічні технології та інженерія

Укладач	Іваненко Ірина Миколаївна, канд. хім. наук, доц.
Відповідальний редактор	Концевой А.Л., канд. техн. наук, доц.
Рецензент	Абрамова А.О., канд. техн. наук, доц.

ЗМІСТ

Вступ.....	4
1. Адсорбція газів на твердій поверхні.....	5
2. Класифікація ізотерм адсорбції.....	5
3. Мономолекулярна адсорбція.....	7
4. Полімолекулярна адсорбція.....	8
5. Адсорбція на пористих адсорбентах	9
6. Мікропористі адсорбенти	10
7. Мезопористі адсорбенти	11
8. Ртутна порометрія.....	12
9. Приклади рішення задач.....	16
9.1 Рішення типових задач з мономолекулярної адсорбції.....	15
9.2 Розрахунок розподілу простору адсорбенту по розмірам пор... ..	18
9.3 Рішення задач з ртутної порометрії	22
10. Задачі для самостійного рішення	25
11. Багатоваріантні задачі	31

ВСТУП

Навчальна дисципліна "Теоретичні основи, технологія і обладнання адсорбційних процесів" належить до Циклу професійної підготовки, а саме Навчальних дисциплін професійної та практичної і являється профілюючою дисципліною в навчальному плані підготовки спеціальності 161 Хімічні технології та інженерія.

Навчальна дисципліна "Теоретичні основи, технологія і обладнання адсорбційних процесів" займає важливе місце у формуванні світогляду сучасного фахівця з хімічних технологій і є завершальною в навчанні майбутніх інженерів з хімічних технологій неорганічних речовин. Навчальний матеріал дисципліни "Теоретичні основи, технологія і обладнання адсорбційних процесів" базується на знаннях дисциплін загальної підготовки «Прикладна хімія», «Фізика», «Загальна та неорганічна хімія», «Фізична хімія», «Загальна хімічна технологія», «Процеси і апарати хімічних виробництв», «Хімічна технологія неорганічних речовин».

Після засвоєння навчальної дисципліни "Теоретичні основи, технологія і обладнання адсорбційних процесів" студент має продемонструвати здатність з широкого кола промислових адсорбентів обирати ті, що найбільш відповідають поставленому завданню очистки промислових газових та/або рідких викидів, рекуперації з них цінних компонентів, а також підбирати найбільш ефективні адсорбенти, придатні до роботи в даних технологічних умовах.

1. Адсорбція газів на твердій поверхні

Адсорбцією називається процес переходу газу з об'ємної фази в поверхневий шар, пов'язаний зі зміною вільної поверхневої енергії шару. Величина адсорбції визначає надлишок маси (молекул) адсорбованої речовини на одиницю поверхні шару в порівнянні з об'ємом. У процесі адсорбції формується адсорбційний шар, тобто шар, утворений на поверхні розділу адсорбенту на кордоні з газом, що складається з адсорбованих молекул і характеризується підвищеною концентрацією в порівнянні з їх концентрацією в об'ємах обох фаз.

У процесі адсорбції брати участь здатна та поверхня адсорбенту, на якій присутні активні центри. Поверхня одиниці маси адсорбенту, на якій відбувається адсорбція називається питомою активною поверхнею.

Питома активна поверхня може бути більше або менше питомої поверхні, розрахованої з геометричних розмірів волокон. Вона визначається наявністю на поверхні волокон полярних груп, надмолекулярної структурою (щільністю упаковки макромолекул), наявністю пор, розміром молекул адсорбату, за допомогою якого вона визначається, тощо. Значення питомої активної поверхні, знайдене методом низькотемпературної адсорбції інертних газів, відповідає значенню питомої поверхні, що розрахована з геометричних розмірів адсорбенту. Питома активна поверхня, знайдена за адсорбцією водяної пари при температурах вище температури склування волокон, як правило на два порядки вище. Для бавовни, наприклад, вона становить 200-400 м².

2. Класифікація ізотерм адсорбції

Аналіз ізотерм адсорбції вказує, що процес адсорбції в багатьох випадках не обмежується утворенням моношару осадження і вже при порівняно низьких значеннях відносного тиску $P/P_s \approx 0,1$ утворюються, як правило, полімолекулярні шари. Брунауер, Деммінг, Деммінг і Теллер (БДДТ) виділили п'ять основних типів ізотерм адсорбції газів на твердих адсорбентах (рис. 1).

Тип I. Ізотерма описується теорією осадження моношару і рівнянням

Ленгмюра за асимптотичного наближення кількості адсорбованого газу до ємності осадження моношару.

Тип II. Найбільш загальний тип ізотерми, що відповідає формуванню полішару на поверхні з високим адсорбційним потенціалом.

Тип III. Тип ізотерми освіти полішару з газового середовища на твердому адсорбенті, для тіл, потенціал осадження першого моношару яких малий і має той же порядок, що й теплота конденсації адсорбтива. Порівняно рідко зустрічається.

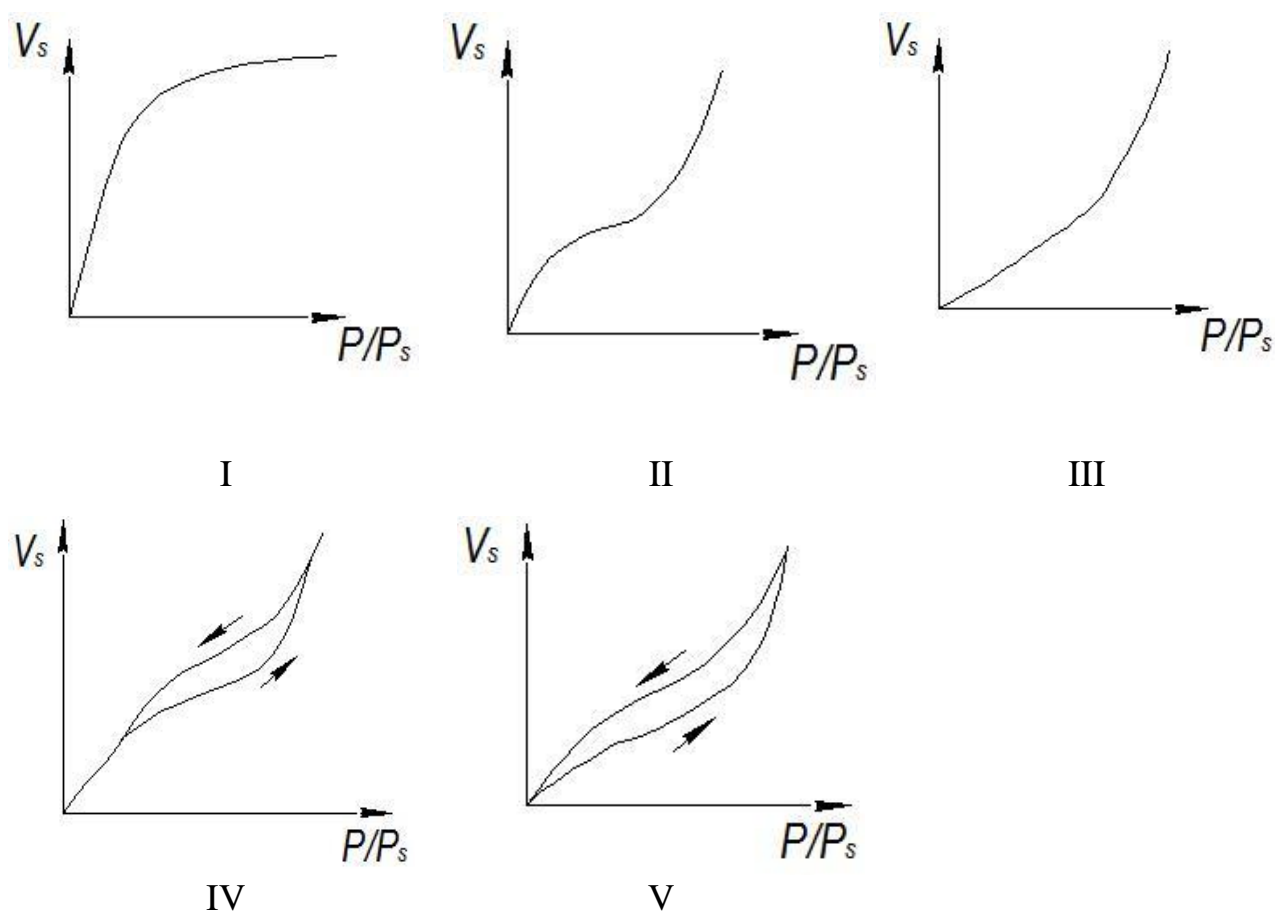


Рис. 1. Основні типи ізотерм адсорбції за класифікацією БДДТ.

Типи IV і V, аналогічні II и III і характерні для поруватих сорбентів, для яких адсорбція обмежена об'ємом мезопор (2-50 нм), а гранична адсорбція досягається за значень тиску $P/P_s \ll 1$. Часто такі ізотерми мають петлю гістерезису, що вказує на додаткове поглинання пари в результаті капілярної конденсації.

3. Мономолекулярна адсорбція

Засновником мономолекулярної моделі фізичної адсорбції був Ленгмюр. Згідно уявлення, що він розвив, адсорбційний шар складається з локалізованих на експотенціальній поверхні молекул, що не взаємодіють одна з одною. Латеральні, тобто бічні, взаємодії в теорії Ленгмюра не враховуються.

Рівноважний процес адсорбції описується рівнянням:

$$\Gamma = \Gamma_m \frac{KP}{1 + KP}, \quad (1)$$

де K – константа рівноваги процесу адсорбції;

Γ_m – межа адсорбції на даному адсорбенті;

P – рівноважний тиск газу.

Межу адсорбції знаходять за однією з лінійних форм рівняння ізотерми адсорбції Ленгмюра:

$$\frac{1}{\Gamma} = \frac{1}{\Gamma_m} + \frac{1}{\Gamma_m Kc}, \quad (2)$$

Після побудови ізотерми адсорбції в координатах цього рівняння знаходять межу адсорбції Γ_m як величину, зворотну відрізка, який відсікається на вісі ординат.

Можна використовувати іншу лінійну форму ізотерми Ленгмюра:

$$\frac{C}{\Gamma} = \frac{1}{\Gamma_m K} + \frac{C}{\Gamma_m} \quad (3)$$

Лінійна залежність $C/\Gamma=f(C)$ відтинає на вісі ординат відрізок, що дозволяє знайти $1/(\Gamma_m \cdot K)$, а тангенс кута нахилу прямої до осі абсцис дорівнює $1/\Gamma_m$.

Питому активну поверхню знаходять після визначення межі адсорбції. Розрахунок проводять за рівнянням:

$$S_{\text{пит}} = \Gamma_m \cdot S_0 \cdot N_a \quad (4)$$

де Γ_m повинна бути виражена в моль/г (або кмоль/кг);

S_0 – називають площею молекулярного перетину адсорбату або частіше – адсорбційним "посадочної майданчиком" (цим параметром є площа, яку займає молекула адсорбату в насиченому мономолекулярному шарі).

Для опису мономолекулярної адсорбції у ряді випадків використовують емпіричне рівняння Фрейндліх:

$$\Gamma = KP^{1/n}, \quad (5)$$

де K і n – емпіричні константи. Константи рівняння Фрейндліха знаходять шляхом випрямлення ізотерми при логарифмування рівняння (5).

4. Полімолекулярная адсорбція

Теорія полімолекулярної адсорбції була розвинена в роботах Брунауера, Еммета і Теллера (БЕТ). В основі цієї теорії лежить поширення узагальнених уявлень локалізованого осадження моношару на полішарову адсорбцію. В теорії БЕТ використовується передумова, що молекули кожного попереднього адсорбційного шару слугують активними центрами при утворенні наступних шарів. Це припускає, що ємність кожного шару однакова. Вважається, що силами взаємодії між молекулами в кожному адсорбційному шарі можна знехтувати (відсутність латеральних взаємодій), а молекули кожного адсорбційного шару локалізовані. Вважається, що адсорбційний потенціал в першому адсорбційному шарі значно вище, ніж в інших шарах, а починаючи з другого адсорбційного шару який можна порівняти з енергією конденсації. Існують такі адсорбенти, на яких формуються такі адсорбційні шари, енергія взаємодії в яких для всіх шарів однакова. Рівняння ізотерми полімолекулярної адсорбції має вигляд:

$$\Gamma = \Gamma_m \frac{CP/P_s}{\left(1 - \frac{P}{P_s}\right) \left[1 - (C-1) \frac{P}{P_s}\right]}, \quad (6)$$

де константа C дорівнює відношенню константи рівноваги в першому адсорбційному шарі до константи рівноваги в будь-якому шарі, починаючи з другого, яка вважається рівною константі процесу конденсації, $C = k_1/k_2$;

Γ_m – ємність будь-якого адсорбційного шару;

P_s – тиск насиченої пари над плоскою поверхнею.

Рівняння (6) відоме як проста форма ізотерми адсорбції БЕТ. Це рівняння може бути представлене у лінійній формі. Позначимо для спрощення $P/P_s = X$ і розділимо на X обидві частини рівняння (6):

$$\frac{X}{\Gamma(1-X)} = \frac{1}{\Gamma_m C} + \frac{C-1}{\Gamma_m C} X, \quad (7)$$

В такій формі графік залежності повинен давати пряму з нахилом відрізком, відтинає на осі ординат. Рішення двох чисельних рівнянь дозволяє визначити постійну рівняння C , межу адсорбції Γ_m в будь-якому моношарі і розрахувати питому активну поверхню.

5. Адсорбція на пористих адсорбентах

Існує багато типів пористих систем. І в різних зразках, і в одному і тому ж зразку окремі пори можуть значно відрізнятися як за формою, так і за розміром. Особливий інтерес у багатьох випадках може представляти поперечний розмір пор, наприклад, діаметр циліндричних пор або відстань між стінками щілиноподібних пор. Зручну класифікацію пор за розмірами запропонував М.М. Дубінін. В даний час ця класифікація офіційно прийнята Міжнародним союзом з теоретичної та прикладної хімії (IUPAC), згідно якої пори поділяються на види за розмірами: мікропори (<2 нм); мезопори (2-50 нм); макропори (>50 нм).

Ця класифікація заснована на наступному принципі: кожен інтервал розмірів пор відповідає характерним адсорбційним властивостями, що знаходить своє вираження в ізотерма адсорбції. У мікропори завдяки близькості стінок пор потенціал взаємодії з адсорбованими молекулами значно більше, ніж у більш широких порах, і величина адсорбції при заданому відносному тиску відповідно

також більше. У мезопорах відбувається капілярна конденсація і на ізотермах спостерігається характерна петля гістерезису. Макропори настільки широкі, що для них неможливо детально вивчити ізотерми адсорбції. Тому такі поруваті тіла вивчають методом ртутної порометрії, визначають тиск, який необхідний для заповнення цих пор ртуттю.

6. Мікропористі адсорбенти

Враховуючи, що в мікропорах поля адсорбційних сил перекриваються, Дубінін і Радушкевіч припустили, що розподіл ступеня заповнення мікропор з диференціальної молярної роботи адсорбції описується гауссовою кривою. Таке припущення приводить до виразу:

$$W = W_0 \cdot \exp(-ke^2), \quad (8)$$

де k – деяка постійна, що залежить від природи адсорбату і адсорбенту; W_0 , W – загальний об'єм пористого простору адсорбенту і об'єм пор, що відповідає потенціалу поля адсорбційних сил.

З огляду на рівняння Поляні для потенціалу поля адсорбційних сил

$$\epsilon = RT \ln \left(\frac{P_s}{P} \right), \quad (9)$$

можна записати

$$W = W_0 \exp \left\{ -D \left[\lg \left(\frac{P}{P_s} \right) \right]^2 \right\}, \quad (10)$$

де $D = k \cdot (2,3 \cdot RT)^2$ – постійна рівняння Дубініна і Радушкевіча.

Зазвичай для визначення загальної пористості адсорбентів це рівняння виражають у лінійній логарифмічній формі:

$$\lg W = \lg W_0 - D [\lg (P/P_s)]^2. \quad (11)$$

Адсорбцію розраховують як $\Gamma = W/V_m$,

де V_m – молярний об'єм адсорбату.

7. Мезопористі адсорбенти

На рис. 1 наведено приклад ізотерми на мезопористих адсорбентах (ізотерма типу IV). Розбіжність гілок адсорбції і десорбції свідчить про капілярну конденсацію, тобто заповненні мезопор внаслідок меншого тиску конденсації над увігнутою поверхнею рідини в капілярах, ніж над плоскою. Таке явище, коли гілки адсорбції і десорбції не збігаються, називається капілярним гістерезисом. Внаслідок різної змочуваності поверхні капіляра рідиною при формуванні плівки адсорбату на поверхні пор при адсорбції (кут натікання) і при видаленні рідини з капілярів (кут відтікання) проявляється гістерезис змочування. Капілярна конденсація в мезопорах починається при досить високому відносному тиску $(P/P_s) > 0,25$ і вже з того, при якому тиску відбувається відхилення форми ізотерми від типу II, можна визначити тип пористості адсорбенту.

Капілярна конденсація в мезопорах робить можливим визначення розподілу поруватого простору за розмірами пор. Для знаходження радіусу пор, заповнених при відповідному рівноважному тиску, використовують рівняння Кельвіна:

$$\frac{\ln P_r}{P_s} = -\frac{2V_m\sigma}{rRT}, \quad (12)$$

де P_r , P_s – тиск над меніском в капілярі і тиск насичення над пласкою поверхнею; V_m – молярний об'єм рідкого адсорбату поверхневий натяг рідкого адсорбату; r – радіус кривизни меніска в капілярах, який зазвичай вважають рівним радіусу капіляра.

Рівняння (12) справедливе тільки для менісків сферичної форми. Крім того, передбачається, що рідкий адсорбат повністю змочує поверхню адсорбенту. Капілярна конденсація буде відбуватися тоді, коли меніск в капілярах, що утворився при адсорбції і формуванні полімолекулярних шарів на першій стадії процесу, буде увігнутим.

Для розрахунку розподілу пор мезопористого адсорбенту за розмірами використовують визначення адсорбції, вважаючи реальним її значення, що

відповідає гілці десорбції. Об'єм поруваного простору можна розрахувати, враховуючи, що $W = \Gamma \cdot V_m$. Наголошуючи на тому тиск капілярної конденсації, при якому знаходять адсорбцію, розраховують радіус капілярів, заповнених в результаті капілярної конденсації, і будують інтегральну та диференціальну криві розподілу. Рівноважним вважається значення адсорбції, що відповідає гілці десорбції.

Для побудови інтегральної кривої на вісі ординат відкладають сумарний об'єм капілярів, відповідний розмірам від r_{min} до r_i .

Для побудови диференціальної кривої проводять графічне диференціювання інтегральної кривої або розраховують значення W при відповідних значеннях Δr , знаходять $\Delta W / \Delta r$ і тоді будують диференціальну криву як функцію від r_{cp} .

8. Ртутна порометрія

Ртутна порометрія – це метод, розроблений для визначення розміру макропор, для яких метод адсорбції газів непридатний. Крайовий кут змочування твердої поверхні ртуттю дорівнює приблизно 140° , тому необхідний надлишковий тиск для її вдавлювання в пори і подолання капілярного тиску. Розрахунок розміру (радіуса) пор проводять за рівнянням Уошборна:

$$r = -\frac{2\sigma \cos\theta}{P}, \quad (13)$$

де P – тиск в рідкій ртуті.

Рівняння (13) є окремим випадком рівняння Лапласа (11).

Визначаючи тиск, який необхідний для вдавлювання ртуті в попередньо вакуумоване порувате тіло і його об'єм, можна розрахувати радіус і об'єм пор, приймаючи їх форму циліндричну. Такий метод дозволяє визначити розмір пор від $3,5 \cdot 10^{-9}$ м (заповнюються при максимальному тиску 200 МПа) до приблизно $7,5 \cdot 10^{-6}$ м (заповнюються при атмосферному тиску). Існують прилади, що дозволяють визначити розмір пор до $1,5 \cdot 10^{-9}$ м, в результаті підвищення тиску до 500 МПа, а нижня межа розширена в результаті застосування тиску, меншої ніж атмосферне.

9. Приклади розв'язання задач

9.1 Рішення типових завдань з мономолекулярної адсорбції

1. Константи рівняння ізотерми адсорбції Фрейндліха (розраховані при вираженні адсорбції в кг CS_2 /кг вугілля) CS_2 для поруватого активованого вугілля марки АРТ-2 при 20°C становлять $K=0,939$; $1/n=0,2606$.

Визначити яка кількість повітря, яке містить $5 \text{ г/м}^3 \text{CS}_2$, можна очистити в адсорбері, що містить 30000 кг вугілля, що має питому активну поверхню $1000 \text{ м}^2/\text{м}$. Розрахувати площу молекули CS_2 у насиченому адсорбційній шарі.

Рішення.

1) Розрахувати ізотерму адсорбції при різних концентраціях в межах 1-10 $\text{г/м}^3 \text{CS}_2$ за рівнянням ізотерми адсорбції Фрейндліха (розмірність адсорбції кг CS_2 /кг вугілля). Результати розрахунків наводимо у таблиці 1.

Таблиця 1. Результати розрахунків

$C \cdot 10^3, \text{кг/м}^3$	1,0	2,0	3,0	4,0	5,0	6,0	7,0	8,0	9,0	10,0
$\Gamma, \text{кг/кг}$	0,154	0,186	0,207	0,224	0,238	0,250	0,260	0,270	0,279	0,287
$(1/C) \cdot 10^{-3}, \text{м}^3/\text{кг}$	1,0	0,5	0,33	0,25	0,2	0,167	0,143	0,125	0,111	0,1
$1/\Gamma, \text{кг/кг}$	6,49	5,38	4,83	4,46	4,20	4,0	3,85	3,7	3,58	3,48

Розрахована за константою рівняння Фрейндліха ізотерма адсорбції CS_2 на активованому вугіллі приведена на рис. 2.

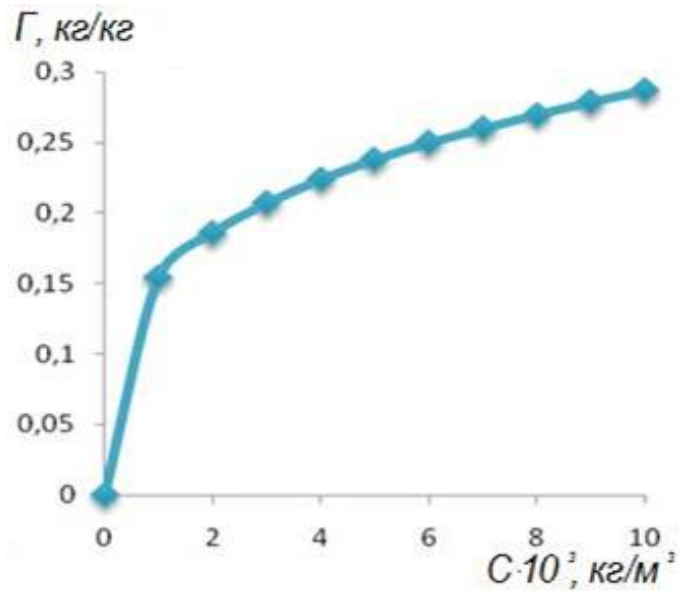


Рис. 2. Ізотерма адсорбції CS_2 на активованому вугіллі.

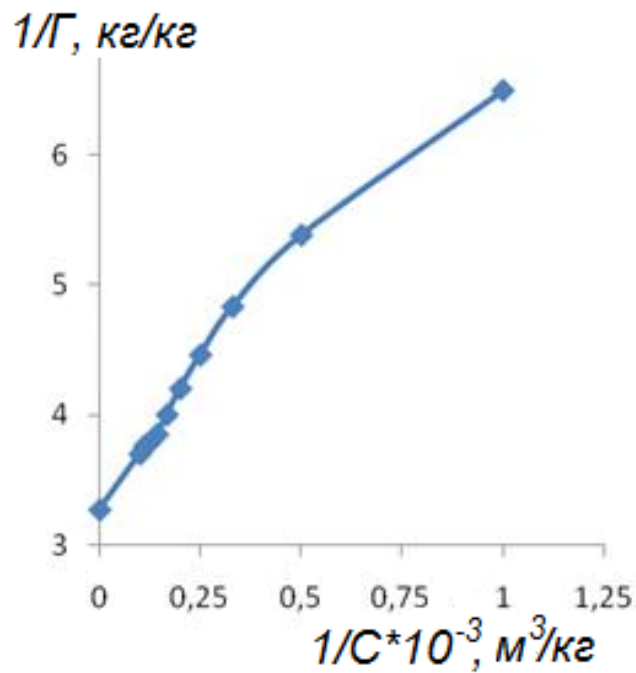


Рис. 3. Ізотерма адсорбції CS_2 на активованому вугіллі в координатах лінійної форми рівняння Ленгмюра.

2) Розраховуємо по випрямленій формі рівняння ізотерми адсорбції Ленгмюра межу адсорбції при вираженні кількості сірковуглецю в одиницях концентрації кг/м^3 . Розмірність знайденої величини межі адсорбції $\text{кг CS}_2/\text{кг вугілля}$.

$$1/\Gamma = 1/\Gamma_m + 1/(\Gamma_m K C) \quad (15)$$

Будуємо графік в координатах рівняння (15). Приклад отриманої залежності наведено на рис. 3. Після обробки лінійної залежності методом найменших квадратів, знаходимо величину, зворотну межі адсорбції сірковуглецю, яка склала $1/\Gamma_m = 3,2139$. Величина границі адсорбції $\Gamma_m = 0,31065$ кг/кг.

3) Розраховуємо об'єм повітря, очищеного на адсорбері.

маса сірковуглецю, яка може бути адсорбована в адсорбері ємністю $g=30000$ кг складе $Q = g \cdot \Gamma_m = 30000 \cdot 0,3106 = 9319,5$ кг. Об'єм очищеного повітря буде дорівнювати:

$$V = Q/c = 9319,5/0,005 = 1863900 = 1,8639 \cdot 10^6 \text{ м}^3.$$

3) Розраховуємо площа молекули в насиченому адсорбційній шарі. Для розрахунку використовуємо формулу:

$$S_0 = S_{num}/(\Gamma_m \cdot N_a)$$

Питома активна поверхня вугілля $S_{num}=1000$ м²/г або 106 м²/кг; молекулярна маса сірковуглецю $M=76$ кг/кмоль; гранична адсорбція $\Gamma_m=0,31065$ кг/кг = $0,31065/76=4,0875 \cdot 10^{-3}$ кмоль / кг.

$$S_0 = 106/4,0875 \cdot 10^{-3} \cdot 6,023 \cdot 10^{26} = 40,6 \cdot 10^{-20}.$$

$$S_0 = 40,6 \cdot 10^{-20} \text{ м}^2/\text{молекула}.$$

9.2 Рішення типових задач для полімолекулярної адсорбції

В результаті низькотемпературної адсорбції азоту на бавовняному волокні отримані дані, що наведені в таблиці 2.

Таблиця 2. Експериментальні дані адсорбції азоту на бавовняному волокні

$P/P_s \cdot 10^2$	1,2	2,1	2,7	3,2	3,5	4,0	4,5	5
$V_s \cdot 10^2, \text{ см}^3/\text{г}$	7,77	9,70	10,84	11,57	12,08	12,9	15,0	18,0
$1-P/P_s$	0,988	0,979	0,973	0,968	0,965			
$(P/P_s)/V_s(1-P/P_s)$	0,156	0,2211	0,256	0,286	0,3002			

Використовуючи рівняння ізотерми адсорбції БЕТ визначте питому активну поверхню бавовняного волокна. Площа, яку займає одна молекула азоту в насиченому мономолекулярному адсорбційному шарі $S=16,25 \cdot 10^{-20}$

м². Густина азоту за нормальних умов $\rho = 1,25 \cdot 10^{-3}$ г/см³. Адсорбція азоту в см³ при нормальних умовах у розрахунку на 1 г адсорбенту.

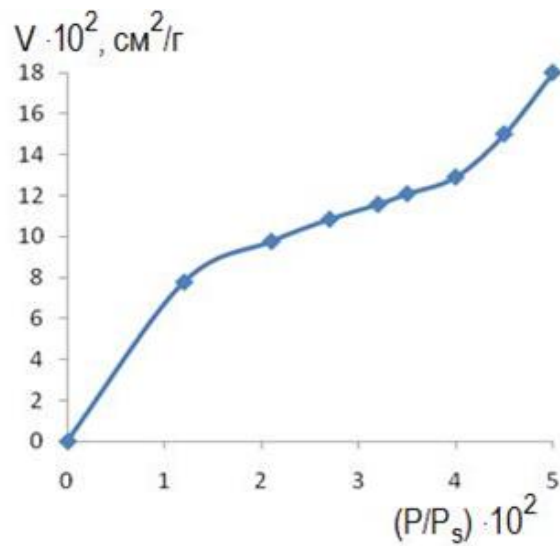


Рис. 4. Ізотерма адсорбції азоту на бавовні.

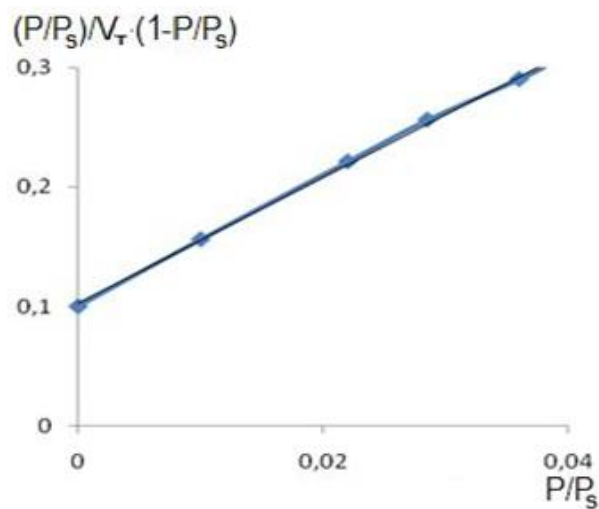


Рис. 5. Лінійна форма ізотерми адсорбції азоту на бавовні.

Рішення

На рис. 4 наведена ізотерма низькотемпературної адсорбції азоту на бавовні. Видно, що адсорбція полімолекулярна. Для розрахунку використовуємо тільки ту ділянку ізотерми, якій відповідає утворення першого мономолекулярного шару. У лінійній формі рівняння ізотерми адсорбції БЕТ має вигляд:

$$\frac{P/P_s}{V_s \left(1 - P/P_s \right)} = \frac{1}{CV_{sm}} + \frac{C-1}{CV_{sm}} P/P_s \quad (16)$$

де P, P_s – рівноважний тиск азоту і тиск насичення при заданій температурі;
 V_s – рівноважна адсорбція, виражена в одиницях об'єму адсорбованого азоту;
 C – константа, що характеризує рівновагу адсорбції.

Розраховуємо величину $(P/P_s)/V_s(1-P/P_s)$ і заносимо знайдені значення в таблицю 2. Будуємо графік у лінійних координатах рівняння БЕТ, приклад якого наведено на рис. 5. З отриманої залежності знаходимо:

1) відрізок, який відсікається на осі ординат:

$$X = 1/(V_{sm} \cdot C) = 0,1 \text{ г/см}^3;$$

2) тангенс кута нахилу отриманої залежності:

$$Y = (C-1)/(V_{sm} \cdot C) = 5,76 \text{ г/см}^3;$$

$$3) \text{ Сума } X + Y = 1/V_{sm} = 5,86 \text{ г/см}^3. V_{sm} = 0,161 \text{ см}^3/\text{м}.$$

Розраховуємо величину межі адсорбції (Γ_m , моль/г):

$$\Gamma_m = V_{sm} \cdot \rho \cdot M = 0,161 \cdot 1,25 \cdot 10^{-3} / 28 = 7,1875 \cdot 10^{-6} \text{ моль/г}.$$

Розраховуємо питому активну поверхню волокон:

$$S_{num} = \Gamma_m \cdot N_a \cdot S_0 = 7,1875 \cdot 10^{-6} \cdot 6,02 \cdot 10^{23} \cdot 16,2 \cdot 10^{-20} = 0,701 \text{ м}^2/\text{г}.$$

$$S_{num} = 0,701 \text{ м}^2/\text{г}.$$

9.3 Розрахунок розподілу пористого простору адсорбенту за розмірами пор

Побудувати криву капілярної конденсації, розрахувати і побудувати інтегральну та диференційну криві розподілу пор за радіусами за даними конденсації парів води на активованому вугіллі при температурі $T=293 \text{ К}$, $V_m=18 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{моль}$, $\sigma=72,5 \cdot 10^{-3} \text{ Дж/м}^2$. Розрахувати загальний об'єм поруватого простору.

Таблиця 3. Експериментальні дані конденсації парів води на активному вугіллі

p/p_s	0,05	0,1	0,2	0,4	0,6	0,8	0,9	0,99
$-\lg p/p_s$	1,3	1,0	0,7	0,4	0,22	0,1	0,05	0,004
$[-\lg(p/p_s)]^2$	1,619	1,0	0,49	0,16	0,048	0,01	0,0025	0,00016
$a_{\text{адсорб}} \cdot 10^3$, МОЛЬ/КГ	2,0	3,0	5,3	6,5	7,3	9,0	10,0	11,5
$a_{\text{десорб}} \cdot 10^3$, МОЛЬ/КГ	2,0	3,7	6,5	8,2	9,0	10,0	10,9	11,5
$W \cdot 10^5$, М ³ /КГ	3,6	6,7	11,7	14,7	16,2	18,0	19,6	20,7
$-\lg W$	4,444	4,174	3,932	3,832	3,790	3,744	3,708	3,684
$r \cdot 10^6$, М	0,36	0,56	0,66	1,17	2,3	4,9	10,2	10,6

Рішення.

Будуємо ізотерми адсорбції і десорбції. Бачимо, що гілки адсорбції і десорбції не збігаються. Це свідчить про перебіг капілярної конденсації. Рівноважне значення адсорбції відповідає десорбційній гілці. Поруватість (W , м³/кг) знаходимо за формулою:

$$W = a \cdot V_m$$

де a – адсорбція, знайдена з десорбційної гілки; V_m – молярний об'єм адсорбату.

Отримані результати наводимо в таблиці. Радіус капілярів, в яких відбувається капілярна конденсація, при відповідному значенні відносного рівноважного тиску (P/P_s) розраховуємо за рівнянням Кельвіна:

$$r = -\frac{2V_m\sigma}{RT\ln(P/P_s)}.$$

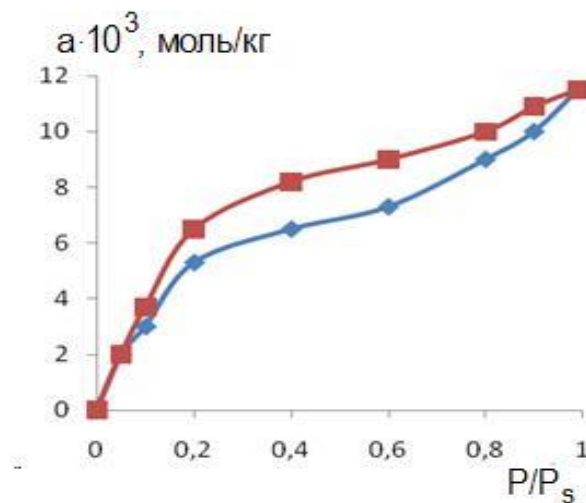


Рис. 6. Ізотерма адсорбції води на активованому вугіллі.

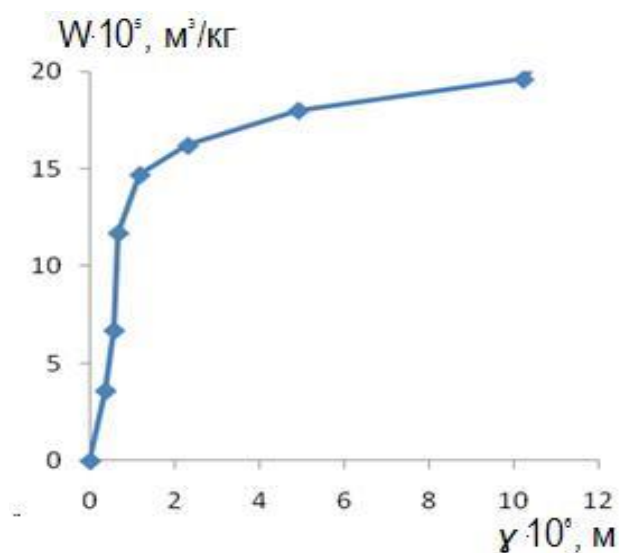


Рис. 7. Інтегральна крива розподілу пор активованого вугілля за розмірами.

Знайдені значення наведено в таблиці 3. Отримані дані використаємо для побудови інтегральної кривої розподілу пор активованого вугілля за розмірами.

Диференціальну криву будуємо в координатах $\Delta W/\Delta r = f(r_{cp})$,
де ΔW – різниця поруватості за двох довільних значень радіусів;
 Δr – різниця цих радіусів;
 $r_{cp} = (r_2 + r_1)/2$ – середнє значення радіусів.

Таблиця 4. Результати розрахунків

$\Delta W \cdot 10^5, \text{ м}^3/\text{кг}$	1,3	2,3	3,1	5,0	1,8	1,2	1,5	1,2	0,9	1,0	0,7
$\Delta r \cdot 10^6, \text{ м}$	0,2	0,16	0,16	0,2	0,24	0,22	0,7	1,5	1,2	3,1	2,2
$(\Delta W/\Delta r) \cdot 10^{-2}, \text{ м}^2/\text{кг}$	0,65	1,44	1,9	2,2	1,05	0,54	0,21	0,08	0,05	0,32	0,31
$r_{\text{ср}} \cdot 10^6, \text{ м}$	0,10	0,28	0,46	0,61	0,78	1,03	0,73	3,05	4,35	6,45	9,10

Загальний об'єм поруватого простору знаходимо з лінійної форми рівняння ізотерми адсорбції Дубініна-Радускевіча для дрібнопоруватих адсорбентів:

$$\lg W = \lg W_0 - D[\lg(P/P_s)]^2.$$

Графік в координатах рівняння Дубініна-Радускевіча показаний на рис. 9. Відрізок, який відсікається на осі ординат, дорівнює $\lg W = -3,73$, звідки $W_0 = 1,87 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3/\text{кг}$.

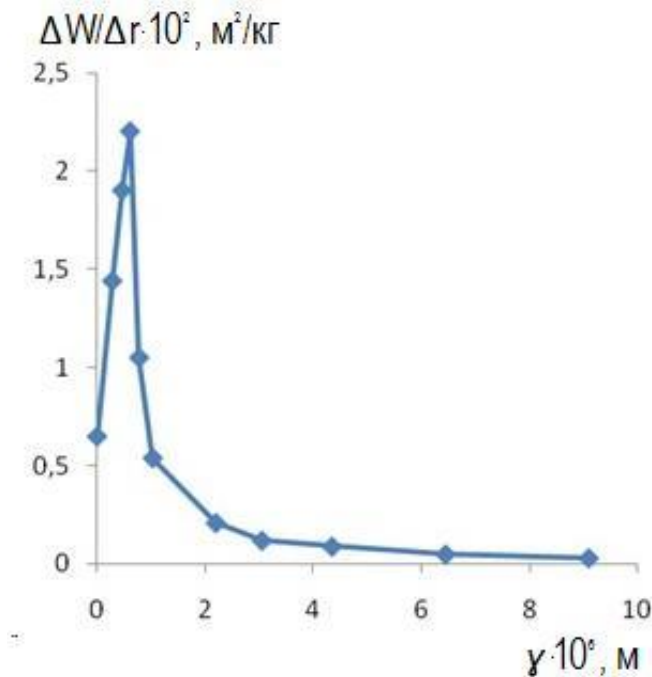


Рис. 8. Диференціальна крива розподілу пор активованого вугілля за розмірами.

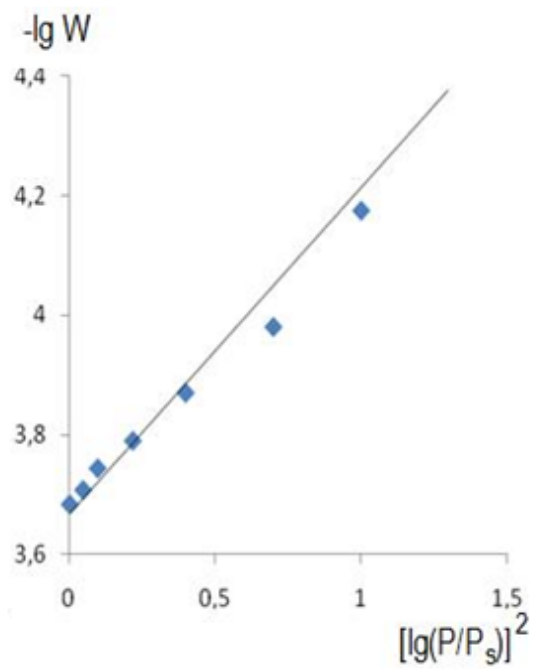


Рис. 9. Ізотерма адсорбції води на активованому вугіллі в координатах лінійної форми рівняння Дубініна-Радушкевіча.

9.4 Рішення задачі на ртутну порометрію

Розрахувати і побудувати інтегральну та диференційну криві розподілу об'єму пор активованого вугілля за розмірами за даними ртутної порометрії, що наведені у таблиці 5. Поверхневий натяг ртуті $\sigma=470 \cdot 10^{-3}$ Дж/м², $\Theta=140^\circ$.

Рішення.

Проводимо розрахунок радіусу пор за рівнянням (13):

$$r = - \frac{2\sigma \cos \Theta}{P} = \frac{2 \cdot 470 \cdot 10^{-3} \cdot 0,766}{P} = \frac{0,72}{P} \text{ м.}$$

Підставляючи значення тиску, розраховуємо радіуси відповідних пор. Знайдені значення наводимо в табл. 5.

За даними, наведеними в цій таблиці, будуємо інтегральну криву розподілу пор активованого вугілля за розмірами.

Таблиця 5. Залежність об'єму втиснутої ртуті (V) від прикладеного тиску (P)

$P \cdot 10^{-5}$, Па	$V \cdot 10^6$, м ³ /кг	$r \cdot 10^9$, м	$P \cdot 10^{-5}$, Па	$V \cdot 10^6$, м ³ /кг	$r \cdot 10^9$, м
22	21,0	327	506	236,4	14
34	45,0	212	608	236,8	11,8
45	87,0	160	712	237,0	10,1
56	120,0	128	811	237,2	8,9
64	150,0	112	905	237,5	7,9
75	169,0	96	1010	237,9	7,1
106	201,0	68	1121	238,0	6,4
206	230,5	35	1225	238,1	5,9
305	234,0	27	1300	238,2	5,5
410	236,0	18	1500	238,3	4,8

Інтегральна крива розподілу наведена на рис. 11.

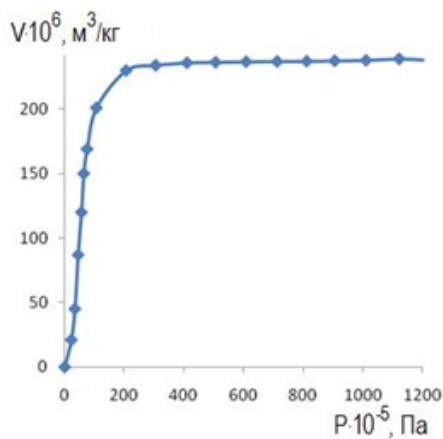


Рис. 10. Порограма активованого вугілля.

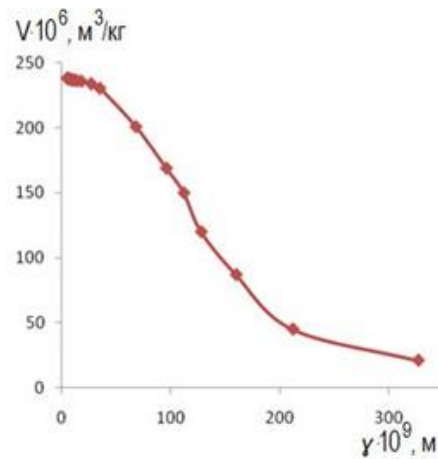


Рис. 11. Інтегральна крива розподілу пор активованого вугілля за розмірами.

Проводимо диференціювання інтегральної кривої розподілу пор активованого вугілля за розмірами, що наведена на рис. 11. Для цього будемо графік на міліметровому папері розміром не менше А4 і беремо довільні значення меж радіусу пор, наприклад через кожні $20 \cdot 10^{-9}$ м (як показано в таблиці 6) і знаходимо відповідні їм значення об'єму заповнення. Наводимо знайдені значення в таблиці і далі будемо диференціальну криву розподілу від значень середнього радіусу пор.

Таблиця 6. Параметри поруватого простору активованого вугілля

$r \cdot 10^9, \text{ м}$	$\Delta r \cdot 10^9, \text{ м}$	$\Delta V \cdot 10^6, \text{ м}^3/\text{кг}$	$(\Delta V / \Delta r) \cdot 10^6, \text{ м}^2/\text{кг}$	$r_{cp} \cdot 10^9, \text{ м}$
280	20	1,50	0,075	270
260	20	2,2	0,11	250
240	20	3,0	0,15	230
220	20	5,8	0,28	210
200	20	9,0	0,45	190
180	20	12,0	0,60	170
160	20	17,0	0,85	150
140	20	24,0	1,20	130
120	20	28,0	1,40	110
100	20	27,0	1,35	90
80	20	18,0	0,90	70
60	20	9,0	0,45	50
40	20	3,5	0,175	30
20	10	2,0	0,10	15

На рис. 12 наведена розрахована диференційна крива розподілу пор активованого вугілля за розмірами.

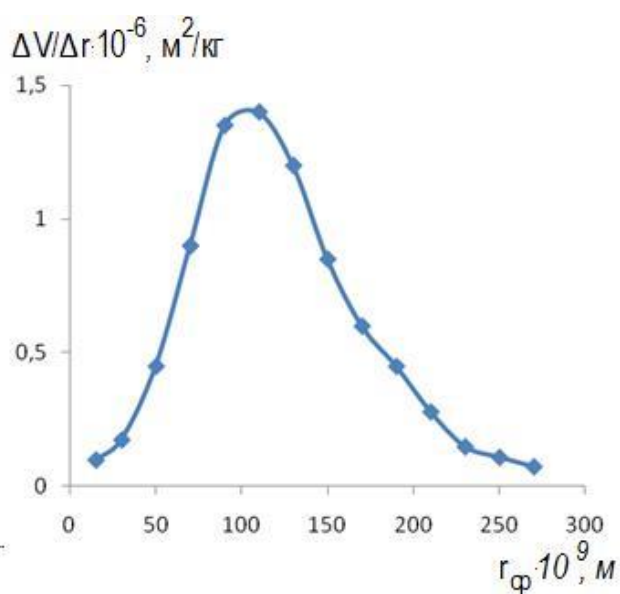


Рис. 12. Диференціальна крива розподілу пор активованого вугілля за розмірами.

10. Задачі для самостійного рішення

1. Побудувати ізоТЕРМИ адсорбції карбону (II) оксиду на активованому вугіллі за температури 278 К і визначити константи рівняння ізоТЕРМИ адсорбції Фрейндліха за експериментальними даними, що наведені в таблиці.

Рівноважний тиск, $P \cdot 10^{-2}$ Н/м ²	10,0	44,8	100,0	144,0	250,0	452,0
Рівноважна адсорбція $\Gamma \cdot 10^3$, кг/кг	32,3	66,7	96,2	117,2	145,0	177,0

2. Використовуючи значення констант рівняння ізоТЕРМИ адсорбції Фрейндліха карбону (II) оксиду на активованому вугіллі $K=1,5 \cdot 10^{-3}$ і $1/n=0,48$ (розмірність адсорбції кг СО/кг вугілля) побудувати ізоТЕРМИ адсорбції при 278 К в інтервалі рівноважних тисків від $2 \cdot 10^2$ до $30 \cdot 10^2$ Н/м². Розрахувати величину межі адсорбції.

3. За константам рівняння ізоТЕРМИ адсорбції Ленгмюра $\Gamma_m=0,182$ кг/кг і $K=1 \cdot 10^{-3}$ розрахувати і побудувати ізоТЕРМИ адсорбції карбону (II) оксиду на активованому вугіллі в межах рівноважних тисків 10^3 - $4 \cdot 10^4$ Н/м². Визначити область рівноважних тисків, в якій справедливо рівняння ізоТЕРМИ адсорбції Фрейндліха.

4. Побудувати ізоТЕРМИ адсорбції карбону (II) оксиду на активованому вугіллі за температури 278 К і визначити константи рівняння ізоТЕРМИ адсорбції Ленгмюра за експериментальними даними. Визначити область рівноважних тисків, в якій справедливо рівняння ізоТЕРМИ адсорбції Фрейндліха.

Рівноважний тиск $P \cdot 10^{-2}$, Н/м ²	49,7	99,8	200,0	297,0	398,5
Рівноважна адсорбція $\Gamma \cdot 10^3$, кг/кг	70,0	91,0	102,0	107,3	108,0

5. Використовуючи рівняння Ленгмюра обчислити величину адсорбції азоту на цеоліті при тиску $P=2,8 \cdot 10^2$ Н/м², якщо $\Gamma_m=3,89 \cdot 10^{-2}$ кг/кг, а $K=1,56 \cdot 10^{-3}$.

6. Константи рівняння Ленгмюра: $\Gamma_m=1,82 \cdot 10^{-2}$ кг/кг, $K=1,4 \cdot 10^{-2}$. Розрахуйте адсорбцію карбону (IV) оксиду на активованому вугіллі при рівноважному тиску $5 \cdot 10^3$ Н/м².

7. Розрахувати радіус капілярів, в яких відбувається капілярна конденсація бензолу на активованому вугіллі при рівноважному тиску $8 \cdot 10^3 \text{ Н/м}^2$. Тиск насиченої пари бензолу $P_s = 9,93 \cdot 10^3 \text{ Н/м}^2$, молярний об'єм бензолу $V_m = 8,9 \cdot 10^{-2} \text{ м}^3/\text{кмоль}$, поверхневий натяг $\sigma = 28,9 \cdot 10^{-3} \text{ Дж/м}^2$. Температура 293 К.

8. Розрахувати радіус капілярів, в яких відбувається капілярна конденсація парів метанолу при 293 К на активованому вугіллі при рівноважному тиску $1,025 \cdot 10^4 \text{ Н/м}^2$. Тиск насиченої пари $P_s = 1,28 \cdot 10^4 \text{ Н/м}^2$, молярний об'єм метанолу $V_m = 4,06 \cdot 10^{-2} \text{ м}^3/\text{кмоль}$, поверхневий натяг $\sigma = 22,6 \cdot 10^{-3} \text{ Дж/м}^2$.

9. Розрахувати радіус капілярів, в яких відбувається капілярна конденсація парів води на силікагелі при рівноважному тиску $1,87 \cdot 10^3 \text{ Н/м}^2$. Тиск насиченої пари води $P_s = 2,34 \cdot 10^3 \text{ Н/м}^2$, молярний об'єм води $V_m = 1,8 \cdot 10^{-2} \text{ м}^3/\text{кмоль}$, поверхневий натяг $\sigma = 72,75 \cdot 10^{-3} \text{ Дж/м}^2$, $T = 298 \text{ К}$.

10. Розрахувати радіус капілярів, в яких відбувається капілярна конденсація води на активованому вугіллі при відносному рівноважному тиску 0,8. Тиск насиченої пари води $P_s = 2,34 \cdot 10^3 \text{ Н/м}^2$, молярний об'єм води $V_m = 1,8 \cdot 10^{-2} \text{ м}^3/\text{кмоль}$, поверхневий натяг $\sigma = 72,75 \cdot 10^{-3} \text{ Дж/м}^2$, $T = 303 \text{ К}$.

11. Розрахувати радіус капілярів, в яких відбувається капілярна конденсація води в порах синтетичного поліаміду при рівноважному тиску $1,75 \cdot 10^3 \text{ Н/м}^2$. Тиск насиченої пари води $P_s = 2,34 \cdot 10^3 \text{ Н/м}^2$, молярний об'єм води $V_m = 1,8 \cdot 10^{-2} \text{ м}^3/\text{кмоль}$, поверхневий натяг $\sigma = 72,75 \cdot 10^{-3} \text{ Дж/м}^2$, $T = 298 \text{ К}$.

12. Побудувати криву капілярної конденсації, розрахувати і побудувати інтегральну та диференційну криві розподілу пор за радіусами за даними конденсації парів метилового спирту на активованому вугіллі при температурі $T = 293 \text{ К}$, $V_m = 4,06 \cdot 10^{-5} \text{ м}^3/\text{моль}$, $\sigma = 22,6 \cdot 10^{-3} \text{ Дж/м}^2$.

p/p_s	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1
$\Gamma_{\text{адсорб}} \cdot 10^3, \text{ моль/кг}$	24,0	28,3	31,0	36,0	46,0	55,0
$\Gamma_{\text{десорб}} \cdot 10^3, \text{ моль/кг}$	24,0	32,0	37,0	44,0	50,0	55,0

13. Побудувати криву капілярної конденсації, розрахувати і побудувати інтегральну та диференційну криві розподілу пор за радіусами за даними конденсації пари бензолу на активованому вугіллі при температурі $T = 293 \text{ К}$, $V_m = 8,9 \cdot 10^{-5} \text{ м}^3/\text{моль}$, $\sigma = 28,9 \cdot 10^{-3} \text{ Дж/м}^2$.

p/p_s	0,19	0,3	0,4	0,6	0,8	0,9	0,99
$\Gamma_{\text{адсорб}} \cdot 10^3$, моль/кг	4,5	5,4	6,5	10,2	14,4	17,0	20,0
$\Gamma_{\text{десорб}} \cdot 10^3$, моль/кг	4,5	6,2	9,0	13,9	17,6	19,0	20,0

14. Побудувати криву капілярної конденсації, розрахувати і побудувати інтегральну та диференційну криві розподілу пор за радіусами за даними конденсації пари бензолу на активованому вугіллі при температурі $T=293$ К, $V_m=8,9 \cdot 10^{-5}$ м³/моль, $\sigma=28,9 \cdot 10^{-3}$ Дж/м², $P_s=99,3 \cdot 10^2$ Па.

$P \cdot 10^2$, Па	20	30	40	50	60	70	80	90	99
$\Gamma_{\text{адсорб}} \cdot 10^3$, моль/кг	4,8	5,4	6,5	7,9	9,6	12,0	14,4	17,6	20,0
$\Gamma_{\text{десорб}} \cdot 10^3$, моль/кг	4,8	6,2	9,0	11,8	14,2	15,9	17,1	19,1	20,0

15. Побудувати криву капілярної конденсації, розрахувати і побудувати інтегральну та диференційну криві розподілу пор за радіусами за даними конденсації парів води на активованому вугіллі при температурі $T=293$ К, $V_m=1,8 \cdot 10^{-5}$ м³/моль, $\sigma=72,75 \cdot 10^{-3}$ Дж/м², $P_s=23,4 \cdot 10^2$ Па.

$\Gamma_{\text{адсорб}} \cdot 10^3$, моль/кг	0,5	2,3	4,0	5,0	10,0	16,0	20,0	28,5
$\Gamma_{\text{десорб}} \cdot 10^3$, моль/кг	0,5	3,7	5,0	7,5	15,0	23,0	27,6	28,5

16. Побудувати криву капілярної конденсації, розрахувати і побудувати інтегральну та диференційну криві розподілу пор за радіусами за даними конденсації парів води на активованому вугіллі при температурі $T=293$ К, $V_m=1,8 \cdot 10^{-5}$ м³/моль, $\sigma=72,75 \cdot 10^{-3}$ Дж/м², $P_s=23,4 \cdot 10^2$ Па.

P/P_s	5,32	10,0	11,34	12,5	14,7	17,3	20,0	23,3
$\Gamma_{\text{адсорб}} \cdot 10^3$, моль/кг	0,5	2,3	4,0	5,0	10,0	16,0	20,0	28,5
$\Gamma_{\text{десорб}} \cdot 10^3$, моль/кг	0,5	3,7	5,0	7,5	15,0	23,0	27,6	28,5

17. Побудувати криву капілярної конденсації, розрахувати і побудувати інтегральну та диференційну криві розподілу пор за радіусами за даними конденсації парів води на активованому вугіллі при температурі $T=293$ К, $V_m=1,8 \cdot 10^{-5}$ м³/моль, $\sigma=72,75 \cdot 10^{-3}$ Дж/м².

P/P_s	0,1	0,2	0,4	0,6	0,8	0,9	1,0
---------	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----

$\Gamma_{\text{адсорб}} \cdot 10^3$, моль/кг	6,5	9,0	11,5	14	22,5	26,5	30
$\Gamma_{\text{десорб}} \cdot 10^3$, моль/кг	7,0	10,3	13,5	16,5	25,0	27,6	30,0

18. Побудувати криву капілярної конденсації, розрахувати і побудувати інтегральну та диференційну криві розподілу пор за радіусами за даними конденсації парів води на активованому вугіллі при температурі $T=293$ К, $V_m=1,8 \cdot 10^{-5}$ м³/моль, $\sigma=72,75 \cdot 10^{-3}$ Дж/м².

P/P_s	0,1	0,2	0,4	0,6	0,8	0,9	1,0
$\Gamma_{\text{адсорб}} \cdot 10^3$, моль/кг	3,75	5,3	6,2	8,75	10,4	12,5	13,2
$\Gamma_{\text{десорб}} \cdot 10^3$, моль/кг	5,7	7,0	7,9	10,0	11,5	13,0	13,2

19. Побудувати криву капілярної конденсації, розрахувати і побудувати інтегральну та диференційну криві розподілу пор за радіусами за даними конденсації парів води на активованому вугіллі при температурі $T=293$ К, $V_m=1,8 \cdot 10^{-5}$ м³/моль, $\sigma=72,75 \cdot 10^{-3}$ Дж/м², $P_s=23,4 \cdot 10^2$ Па.

$P \cdot 10^2$, Па	2,94	5,86	11,7	17,5	20,2	23,4
$\Gamma_{\text{адсорб}} \cdot 10^3$, моль/кг	1,0	1,4	1,7	2,3	3,0	5,0
$\Gamma_{\text{десорб}} \cdot 10^3$, моль/кг	1,1	1,5	2,0	2,6	3,5	5,0

20. Побудувати криву капілярної конденсації, розрахувати і побудувати інтегральну та диференційну криві розподілу пор за радіусами за даними конденсації парів води на активованому вугіллі при температурі $T=293$ К, $V_m=1,8 \cdot 10^{-5}$ м³/моль, $\sigma=72,75 \cdot 10^{-3}$ Дж/м², $P_s=23,4 \cdot 10^2$ Па.

$P \cdot 10^{-2}$, Па	2,34	4,68	7,03	9,35	11,7	14,0	16,4	21,0	23,4
$\Gamma_{\text{адсорб}} \cdot 10^3$, моль/кг	4,0	6,0	7,3	8,3	9,0	9,5	10,0	12,6	17,0
$\Gamma_{\text{десорб}} \cdot 10^3$, моль/кг	4,0	6,0	7,3	8,3	9,0	11,0	11,6	14,0	17,0

21. Побудувати криву капілярної конденсації, розрахувати і побудувати інтегральну та диференційну криві розподілу пор за радіусами за даними конденсації парів води на активованому вугіллі при температурі $T=293$ К, $V_m=1,8 \cdot 10^{-5}$ м³/моль, $\sigma=72,75 \cdot 10^{-3}$ Дж/м².

P/P_s	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8
$\Gamma_{\text{адсорб}} \cdot 10^3$, моль/кг	1,75	3,22	3,6	4,67	5,55	6,7	6,9	9,18
$\Gamma_{\text{десорб}} \cdot 10^3$, моль/кг	2,66	3,78	4,90	6,16	6,95	7,70	8,45	9,22

22. Побудувати криву капілярної конденсації, розрахувати і побудувати інтегральну та диференційну криві розподілу пор за радіусами за даними конденсації парів води на активованому вугіллі при температурі $T=293$ К, $V_m=4,06 \cdot 10^{-5}$ м³/моль, $\sigma=22,6 \cdot 10^{-3}$ Дж/м², $P_s=12,8 \cdot 10^3$ Па.

$P \cdot 10^{-3}$, Па	1,28	2,56	3,84	5,12	6,4	7,68	9,0	10,2
$\Gamma_{\text{адсорб}} \cdot 10^3$, моль/кг	7,5	8,0	8,3	8,6	9,4	10,2	11,4	13,0
$\Gamma_{\text{десорб}} \cdot 10^3$, моль/кг	7,5	8,3	9,0	9,6	10,2	11,0	11,7	13,0

23. Побудувати криву капілярної конденсації, розрахувати і побудувати інтегральну та диференційну криві розподілу пор за радіусами за даними конденсації парів води на активованому вугіллі при температурі $T=293$ К, $V_m=4,06 \cdot 10^{-5}$ м³/моль, $\sigma=22,6 \cdot 10^{-3}$ Дж/м², $P_s=12,8 \cdot 10^3$ Па.

$P \cdot 10^{-3}$, Па	1,6	3,2	6,4	7,9	9,6	11,0	12,8
$\Gamma_{\text{адсорб}} \cdot 10^3$, моль/кг	2,5	3,5	4,8	6,3	13,0	19,0	22,5
$\Gamma_{\text{десорб}} \cdot 10^3$, моль/кг	2,5	3,5	4,8	6,5	17,5	21,2	22,5

24. Побудувати криву капілярної конденсації, розрахувати і побудувати інтегральну та диференційну криві розподілу пор за радіусами за даними конденсації парів води на активованому вугіллі при температурі $T=293$ К, $V_m=4,06 \cdot 10^{-5}$ м³/моль, $\sigma=22,6 \cdot 10^{-3}$ Дж/м².

P/P_s	0,2	0,4	0,6	0,8	0,9	1,0
$\Gamma_{\text{адсорб}} \cdot 10^3$, моль/кг	0,8	1,3	1,6	2,32	3,4	3,87
$\Gamma_{\text{десорб}} \cdot 10^3$, моль/кг	0,8	1,3	1,7	3,0	3,7	3,87

25. У таблиці наведено результати вивчення адсорбції етану на цеоліті при $T=298$ К.

$P \cdot 10^{-4}$, Па	0,75	1,00	1,50	2,00	2,50	3,00
a , моль /кг	2,31	2,37	2,53	2,83	3,21	3,77

Визначте загальну поруватість цеоліту використовуючи метод Дубініна-Радушкевіча. Тиск насиченої пари етану за цієї температури $P_s=3,7 \cdot 10^4$ Па, молярний об'єм етану $V_m=6,4 \cdot 10^{-5}$ м³/моль.

26. У таблиці наведено результати вивчення адсорбції етану на цеоліті при $T=298$ К.

$P \cdot 10^{-4}$, Па	0,873	1,21	1,54	1,88	2,22	2,56
a , моль /кг	2,341	2,42	2,55	2,75	2,99	3,25

Визначте загальну поруватість цеоліту, використовуючи метод Дубініна-Радушкевіча. Тиск насиченої пари етану за цієї температури $P_s=3,7 \cdot 10^4$ Па, молярний об'єм етану $V_m=6,4 \cdot 10^{-5}$ м³/моль.

27. У таблиці наведено результати вивчення адсорбції етану на цеоліті при $T=298$ К.

$P \cdot 10^{-4}$, Па	0,985	1,32	1,66	1,99	2,33	2,67
a , моль /кг	2,367	2,46	2,61	2,83	3,09	3,34

Визначте загальну поруватість цеоліту використовуючи метод Дубініна - Радушкевіча. Тиск насиченої пари етану за цієї температури $P_s=3,7 \cdot 10^4$ Па, молярний об'єм етану $V_m=6,4 \cdot 10^{-5}$ м³/моль.

28. У таблиці наведено результати вивчення адсорбції етану на цеоліті при $T=298$ К.

$P \cdot 10^{-4}$, Па	1,10	1,43	1,77	2,11	2,45	2,90
a , моль /кг	2,392	2,50	2,68	2,91	3,16	3,55

Визначте загальну поруватість цеоліту використовуючи метод Дубініна-Радушкевіча. Тиск насиченої пари етану за цієї температури становить $P_s=3,7 \cdot 10^4$ Па, молярний об'єм етану $V_m=6,4 \cdot 10^{-5}$ м³/моль.

11. Багатоваріантні задачі

29. У результаті низькотемпературної адсорбції азоту на волокні отримані дані, наведені в таблиці 7. Використовуючи рівняння ізотерми адсорбції БЕТ визначте питому площі поверхні волокна. Площа, яку займає одна молекула азоту в насиченому мономолекулярному адсорбційній шарі $S_0=16,25 \cdot 10^{-20} \text{ м}^2$. Густина азоту при нормальних умов $\rho=1,25 \cdot 10^{-3} \text{ г/см}^3$. Адсорбція азоту виражена в см^3 в нормальних умовах у розрахунку на 1 г адсорбенту.

Таблиця 7. Багатоваріанта умова задачі

Варі ант	Рівноважна адсорбція азоту на волокнах ($V \cdot 10^2, \text{ см}^3/\text{г}$) за відносного рівноважного тиску ($P/P_s \cdot 10^2$)										
	$P/P_s \cdot 10^2$	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	3,5	4,0	4,5	5,0
1	Бавовна	5,5	7,6	9,0	10,2	11,0	11,8	-	-	-	-
2	Льон	-	3,2	4,6	5,6	6,5	7,2	7,8	8,4	-	-
3	Поліефір	1,4	2,2	2,5	2,9	3,1	3,4	3,6	-	-	-
4	Шерсть	3,5	6,0	-	8,7	9,6	10,4	10,9	-	-	-
5	Поліамідд	-	0,9	-	1,6	-	2,1	-	2,5	-	2,7
6	Лавсан	-	3,6	4,2	-	5,6	6,4	7,0	-	7,9	-
7	Капрон	-	1,9	3,0	-	4,8	5,7	-	6,3	7,0	-
8	Хлорин	-	1,8	-	3,0	4,0	-	4,9	5,4	5,9	6,2
9	Шовк	4,8	7,2	8,5	9,6		11,6		12,5		
10	Моноацетат целюлози	0,7	1,5	2,2	2,7	3,0	3,2	3,3	3,7	4,6	-
11	Гідрат- целлюлоза	-	-	1,5	2,3	2,8	3,1	3,3	-	3,8	-
12	Віскоза	3,4	-	5,0	6,7	8,0	-	9,4	-	-	-
13	Х/б расшлихт.	4,0	7,5	9,2	10,0	10,8	11,4	12,0	13,0	15,2	17,3
14	Целюлоза	2,5	5,5	7,3	8,0	8,6	9,4	9,8	10,7	12,6	15,0
15	Х/б відварене	3,2	6,6	8,4	9,0	9,7	10,5	11,2	12,3	14,1	16,0
16	Х/б відбілене	5,0	8,8	10,5	11,0	11,9	12,6	13,1	14,1	16,2	18,3
17	Х/б мерсер.	6,0	9,7	11,0	12,0	12,9	13,7	14,2	15,1	17,2	19,2

18	Діацетат целюлози	4,0	7,5	9,2	10,0	10,8	11,4	12,0	13,0	15,2	17,3
19	Триацетат целюлози	2,5	5,5	7,3	8,0	8,6	9,4	9,8	10,7	12,6	15,0
20	Хлорин	3,2	6,6	8,4	9,0	9,7	10,5	11,2	12,3	14,1	16,0
21	Поліпропілен	5,0	8,8	10,5	11,0	11,9	12,6	13,1	14,1	16,2	18,3
22	Целюлоза відб.	6,0	9,7	11,0	12,0	12,9	13,7	14,2	15,1	17,2	19,2

30. Використовуючи рівняння БЕТ, розрахувати повну активну поверхню волокон за результатами визначення адсорбції парів води при температурі $T=293$ К. Молярний об'єм води $V_m=1,8 \cdot 10^{-5}$ м³/моль; $S_0=18,5 \cdot 10^{-20}$ м²/молекула.

Таблиця 8. Багатоваріанта умова задачі

Варі- ант	Рівноважна адсорбція води на волокнах ($V_s \cdot 10^2$, см ³ /г) за відносного рівноважного тиску ($P/P_s \cdot 10^2$)										
$P/P_s \cdot 10^2$		0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	3,5	4,0	4,5	5,0
23	Моноацетат целюлози	0,4	1,2	2,0	2,5	2,9	3,2	3,6	4,2	5,2	7,2
24	Хлорин	0,5	1,4	2,2	2,7	3,1	3,4	3,8	4,4	5,4	7,5
25	Поліефір	0,76	1,6	2,4	2,9	3,3	3,5	4,0	4,6	5,6	7,7
26	Капрон	0,97	1,8	2,6	3,2	3,8	4,0	4,2	4,8	5,8	7,9
27	Поліамід	1,16	2,0	2,8	3,4	4,0	4,2	4,4	5,0	6,0	8,1
28	Лавсан	1,26	2,1	2,9	3,5	4,1	4,3	4,5	5,1	6,1	8,2
29	Бавовна	1,5	2,3	3,2	3,7	4,3	4,6	4,8	5,4	6,4	8,5
30	Целюлоза сульфатна	1,8	2,6	3,5	4,0	4,6	4,9	5,1	5,7	6,7	8,8
31	Шовк	1,9	2,9	3,8	4,3	4,9	5,2	5,4	6,0	7,0	9,1
32	Шерсть	2,0	3,2	4,1	4,6	5,2	5,5	5,7	6,3	7,3	9,4

31. За ізотерми адсорбції бензолу при 293 К визначити питому поверхню адсорбенту. $S_0=49 \cdot 10^{-20}$ м²/молекула. Об'єм адсорбованого бензолу приведений до нормальних умов. Густина бензолу $\rho=9,87 \cdot 10^2$ кг/м³.

Таблиця 9. Багатоваріанта умова задачі

Варі- ант	Рівноважна адсорбція бензолу за відносного рівноважного тиску (P/P_s)						
	P/P_s						
1	P/P_s	0,017	0,09	0,12	0,19	0,23	0,28
	$V \cdot 10^2, \text{м}^3/\text{кг}$	0,16	0,72	0,95	1,31	1,45	1,61
2	P/P_s	0,035	0,07	0,14	0,17	0,24	0,297
	$V \cdot 10^2, \text{м}^3/\text{кг}$	0,315	0,60	1,05	1,23	1,50	1,66
3	P/P_s	0,052	0,10	0,16	0,21	0,26	0,31
	$V \cdot 10^2, \text{м}^3/\text{кг}$	0,461	0,84	1,15	1,38	1,56	1,7
4	P/P_s	0,10	0,15	0,20	0,25	0,30	0,35
	$V \cdot 10^2, \text{м}^3/\text{кг}$	0,79	1,12	1,36	1,52	1,65	1,78
5	P/P_s	0,05	0,10	0,15	0,20	0,25	0,285
	$V \cdot 10^2, \text{м}^3/\text{кг}$	1,8	2,6	3,3	3,7	4,0	4,36
6	P/P_s	0,015	0,07	0,13	0,16	0,19	0,24
	$V \cdot 10^2, \text{м}^3/\text{кг}$	0,59	2,23	3,18	3,46	3,65	3,90
7	P/P_s	0,03	0,06	0,12	0,15	0,21	0,255
	$V \cdot 10^2, \text{м}^3/\text{кг}$	1,07	1,89	3,00	3,33	3,73	4,02
8	P/P_s	0,045	0,09	0,10	0,18	0,22	0,27
	$V \cdot 10^2, \text{м}^3/\text{кг}$	1,50	2,53	2,78	3,56	3,81	4,16
9	P/P_s	0,015	0,06	0,10	0,15	0,19	0,24
	$V \cdot 10^2, \text{м}^3/\text{кг}$	0,21	0,75	1,14	1,40	1,56	1,68
10	P/P_s	0,03	0,07	0,12	0,16	0,21	0,25
	$V \cdot 10^2, \text{м}^3/\text{кг}$	0,41	0,90	1,24	1,47	1,60	1,72
11	P/P_s	0,045	0,09	0,13	0,18	0,22	0,27
	$V \cdot 10^2, \text{м}^3/\text{кг}$	0,59	1,03	1,33	1,52	1,64	1,77
12	P/P_s	0,05	0,10	0,15	0,20	0,25	0,30
	$V \cdot 10^2, \text{м}^3/\text{кг}$	0,64	1,12	1,39	1,57	1,71	1,90

32. Розрахувати і побудувати інтегральну та диференційну криві розподілу об'єму пор активованого вугілля за розмірами за даними ртутної порометрії, що наведені в таблиці. Поверхневий натяг ртуті $\sigma=470 \cdot 10^{-3} \text{ Дж/м}^2$, $\Theta=140^\circ$.

Таблиця 10. Багатоваріанта умова задачі

Варіант	1	2	3	4	5	6	7	8
$P \cdot 10^{-5}, \text{Па}$	Об'єм пор $V \cdot 10^6, \text{м}^3/\text{кг}$							
19	3	5	7	9	11	6	8	10
28	51	53	55	57	59	54	56	58
39	97	100	102	104	106	101	103	105
52	137	139	141	143	145	140	142	144
59	171	173	175	177	179	174	176	178

72	181	183	185	187	189	184	186	188
99	198	201	203	205	207	202	204	206
198	214	217	219	221	223	218	220	222
387	228	230	232	234	236	231	233	235
452	231	233	235	237	239	234	236	238
500	232	235	239	238	240	238	240	239,5
598	232,5	236	240	239	240,5	238,5	240,8	240
689	233	236,5	240,5	239,5	240,8	239	241	240,5
791	233,5	236,8	240,8	239,7	241	239,4	241,2	240,9
877	234,0	237,0	241,0	239,9	241,2	239,6	241,5	241
997	234,2	237,2	241,2	240,0	241,5	239,8	241,9	241,4
1156	234,4	237,4	241,5	240,3	241,9	240	242	241,8
1287	234,6	237,8	241,9	240,5	242	240,2	242,4	242

Таблиця 10 (продовження)

Варіант	9	10	11	12	13	14	15	16
$P \cdot 10^{-5}$, Па	Об'єм пор $V \cdot 10^6$, м ³ /кг							
9	7	5	2	2	3	6	8	10
16	35	33	30	31	32	34	36	38
20	134	132	129	130	131	133	135	137
29	179	177	174	175	176	178	180	182
38	195	193	190	191	192	194	196	198
46	211	209	206	207	208	210	212	214
55	216	214	211	212	213	215	217	219
65	221	219	216	217	218	220	222	224
92	228	224	223	224	225	225	230	232
142	231	229	226	227	228	230	232	234
195	235	233	230	231	232	234	236	238
255	238	236	233	234	235	237	239	241
349	243	241	238	239	240	242	244	246
461	245	245	242	243	244	246	247	248
553	246	245,5	243	244	245	248	248	248,6
641	246,5	246	243,5	244,2	245,4	249	248,4	248,9
722	247	246,9	243,9	244,4	245,9	249,5	248,6	249,1

Таблиця 10 (продовження)

Варіант	17	18	19	20	21	22	23	24
$P \cdot 10^{-5}$, Па	Об'єм пор $V \cdot 10^6$, м ³ /кг							
5	8	6	10	12	4	5	7	8
9	47	44	50	54	40	41	45	46
12	98	98	91	95	94	95	97	98

16	155	150	158	162	146	147	149	150
20	197	194	200	204	190	191	192	193
30	208	204	211	215	200	201	202	203
50	221	218	224	229	214	215	216	217
70	226	223	230	234	219	220	221	222
100	228	225	232	236	221	222	223	223
190	235	232	238	240	228	228	229	228
240	237	234	241	242	230	229	230	229
300	239	236	243	243	232	230	231	230
400	242	238	244	244	236	231	232	231
500	244	239	245	245	238	232	233	231,6
600	245	240	246	246	239	232,5	233,6	231,9
800	245,5	241	247	246,5	239,5	233	234	232
1000	246	242	247,6	247	240	233,6	234,4	232,4

Список літератури

1. Фенелонов, В. Б. Пористый углерод / В. Б. Фенелонов. – Новосибирск: Ин-т катализа, 1995. – 518 с.
2. Адсорбция органических веществ из воды / [А.М. Когановский, Н.А. Клименко, Т.М. Левченко и др.]. – Л.: Химия, 1990. – 256 с.
3. Кельцев, Н. В. Основы адсорбционной техники / Н. В. Кельцев. – М.: Химия, 1984. – 592 с.
4. Грег, С. Адсорбция. Удельная поверхность / С. Грег, К. Синг ; перевод с англ. А. П. Карнаухова. – М.: Мир, 1984. – 310 с.
5. Кинле Х. Активные угли и их промышленное применение / Х. Кинле, Э. Бадер; перевод с нем. Т. Б. Сергеевой. – Л.: Химия, 1984. – 216 с.
6. Тарковская И.А. Окисленный уголь. – К.: Наук. думка, 1981. – 200 с.
7. Когановский, Александр Маркович. Адсорбция и ионный обмен в процессах водоподготовки и очистки сточных вод /А. М. Когановский ; АН УССР, Ин-т коллоид. химии и химии воды им. А. В. Думанского. – К. : Наук. думка, 1983. – 240 с.